

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-74215

(43) 公開日 平成10年(1998) 3月17日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 6 F 17/50			G 0 6 F 15/60	6 2 8 A
G 0 6 T 17/40			15/62	3 5 0 K

審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願平9-128601

(22) 出願日 平成9年(1997) 5月19日

(31) 優先権主張番号 特願平8-127438

(32) 優先日 平8(1996) 5月22日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72) 発明者 佐藤 裕一

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
地1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 平田 光徳

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
地1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 丸山 次人

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
地1号 富士通株式会社内

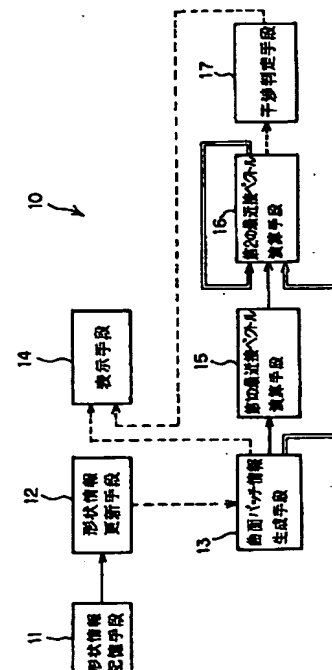
(74) 代理人 弁理士 山田 正紀

(54) 【発明の名称】 物体間距離演算装置および物体間距離演算プログラム記憶媒体

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 コンピュータ上に構築された物体 (C G (コンピュータグラフィックス) モデル) の最近接間距離を算出する物体間距離演算装置に関し、2つの凸物体間の距離を高速に算出する。

【解決手段】 2つの凸物体のうちの一方の凸物体 (自分) から他方の凸物体 (相手) に向かう方向の最近接ベクトルと、自分 (一方の凸物体) を構成する頂点の位置ベクトル、もしくは制御点の位置ベクトルとの内積のうち、一方の凸物体の、他方の凸物体に対する最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ原理で、2つの凸物体の最近接点を結ぶ最近接ベクトルを求める第1の最近接ベクトル演算手段と、凸曲面物体の最近接点で凸曲面物体に接する平面と2つの凸物体の最近接点を結ぶ最近接ベクトルとが直交する原理で、第1の最近接ベクトル演算手段で求めた最近接ベクトルを新たな最近接ベクトルに修正する第2の最近接ベクトル演算手段とを備えた。



1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 一方が凸多面体であることが許容され他方もしくは双方が凸曲面のパッチの集合からなる凸曲面物体で構成されてなる 2 つの 3 次元凸物体の最近接点間距離を、該 2 つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算装置において、前記 2 つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、該 2 つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、該一方の凸物体を構成する、該一方の凸物体が凸多面体である場合の頂点の位置ベクトル、もしくは該一方の凸物体が凸曲面物体である場合の該凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、該一方の凸物体の、該他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、該一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第 1 の最近接ベクトル演算手段と、前記第 1 の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、前記凸曲面物体の最近接点で該凸曲面物体に接する平面と直交する新たな最近接ベクトルに修正する第 2 の最近接ベクトル演算手段とを備えたことを特徴とする物体間距離演算装置。

【請求項 2】 前記第 2 の最近接ベクトル演算手段で求められた前記新たな最近接ベクトルに基づいて、前記 2 つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を備えたことを特徴とする請求項 1 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 3】 前記 2 つの凸物体のうちの一方が凸多面体である場合における該凸多角形の頂点の集合を包含する、前記凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を記憶する形状情報記憶手段と、

前記凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいて、該凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報を求める形状情報更新手段と、

前記凸曲面物体の形状情報に基づいて該凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを生成する曲面パッチ情報生成手段とを備えたことを特徴とする請求項 1 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 4】 前記第 2 の最近接ベクトル演算手段が、前記凸物体が移動もしくは変形された場合に、前記第 1 の最近接ベクトル演算手段において移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、前記第 2 の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最近接ベクトルに修正するものであることを特徴とする請求項 3 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 5】 前記形状情報記憶手段に記憶された形状

2

情報および前記形状情報更新手段により求められた新たな形状情報に基づいて描画された凸物体を表示する表示手段を備えたことを特徴とする請求項 3 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 6】 一方が凸多角形であることが許容され他方もしくは双方が凸曲線のパッチの集合からなる凸曲線物体で構成されてなる 2 つの 2 次元凸物体の最近接点間距離を、該 2 つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算装置において、

前記 2 つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、該 2 つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、該一方の凸物体を構成する、該一方の凸物体が凸多角形である場合の頂点の位置ベクトル、もしくは該一方の凸物体が凸曲線物体である場合の該凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、該一方の凸物体の、該他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、該一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第 1 の最近接ベクトル演算手段と、

前記第 1 の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、前記凸曲線物体の最近接点で該凸曲線物体に接する直線と直交する新たな最近接ベクトルに修正する第 2 の最近接ベクトル演算手段とを備えたことを特徴とする物体間距離演算装置。

【請求項 7】 前記第 2 の最近接ベクトル演算手段で求められた前記新たな最近接ベクトルに基づいて、前記 2 つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を備えたことを特徴とする請求項 6 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 8】 前記 2 つの凸物体のうちの一方が凸多角形である場合における該凸多角形の頂点の集合を包含する、前記凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を記憶する形状情報記憶手段と、

前記凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいて、該凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報を求める形状情報更新手段と、

前記凸曲線物体の形状情報に基づいて該凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを生成する曲線パッチ情報生成手段とを備えたことを特徴とする請求項 6 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 9】 前記第 2 の最近接ベクトル演算手段が、前記凸物体が移動もしくは変形された場合に、前記第 1 の最近接ベクトル演算手段において移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、前記第 2 の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最

3

近接ベクトルに修正するものであることを特徴とする請求項 8 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 10】 前記形状情報記憶手段に記憶された形状情報および前記形状情報更新手段により求められた新たな形状情報に基づいて描画された凸物体を表示する表示手段を備えたことを特徴とする請求項 8 記載の物体間距離演算装置。

【請求項 11】 一方が凸多面体であることが許容され他方もしくは双方が凸曲面のパッチの集合からなる凸曲面物体で構成されてなる 2 つの 3 次元凸物体の最近接点間距離を、該 2 つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算プログラムであって、

前記 2 つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、該 2 つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、該一方の凸物体を構成する、該一方の凸物体が凸多面体である場合の頂点の位置ベクトル、もしくは該一方の凸物体が凸曲面物体である場合の該凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、該一方の凸物体の、該他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、該一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第 1 の最近接ベクトル演算手段と、前記第 1 の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、前記凸曲面物体の最近接点で該凸曲面物体に接する平面と直交する新たな最近接ベクトルに修正する第 2 の最近接ベクトル演算手段とを有する物体間距離演算プログラムが格納されてなることを特徴とする物体間距離演算プログラム記憶媒体。

【請求項 12】 前記物体間距離演算プログラムが、前記第 2 の最近接ベクトル演算手段で求められた前記新たな最近接ベクトルに基づいて、前記 2 つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を有するものであることを特徴とする請求項 11 記載の物体間距離演算プログラム記憶媒体。

【請求項 13】 前記物体間距離演算プログラムが、前記 2 つの凸物体のうちの一方が凸多面体である場合における該凸多角形の頂点の集合を包含する、前記凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を、前記凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいて該凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報に更新する形状情報更新手段と、前記凸曲面物体の形状情報に基づいて該凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを生成する曲面パッチ情報生成手段とを有するものであることを特徴とする請求項 11 記載の物体間距離演算プログラム記憶媒体。

【請求項 14】 前記第 2 の最近接ベクトル演算手段

4

が、前記凸物体が移動もしくは変形された場合に、前記第 1 の最近接ベクトル演算手段において移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、前記第 2 の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最近接ベクトルに修正するものであることを特徴とする請求項 13 記載の物体間距離演算プログラム記憶媒体。

【請求項 15】 一方が凸多角形であることが許容され他方もしくは双方が凸曲線のパッチの集合からなる凸曲線物体で構成されてなる 2 つの 2 次元凸物体の最近接点間距離を、該 2 つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算プログラムであって、

前記 2 つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、該 2 つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、該一方の凸物体を構成する、該一方の凸物体が凸多角形である場合の頂点の位置ベクトル、もしくは該一方の凸物体が凸曲線物体である場合の該凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、該一方の凸物体の、該他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、該一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第 1 の最近接ベクトル演算手段と、前記第 1 の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、前記凸曲線物体の最近接点で該凸曲線物体に接する直線と直交する新たな最近接ベクトルに修正する第 2 の最近接ベクトル演算手段とを有する物体間距離演算プログラムが格納されてなることを特徴とする物体間距離演算プログラム記憶媒体。

【請求項 16】 前記物体間距離演算プログラムが、前記第 2 の最近接ベクトル演算手段で求められた前記新たな最近接ベクトルに基づいて、前記 2 つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を有するものであることを特徴とする請求項 15 記載の物体間距離演算プログラム記憶媒体。

【請求項 17】 前記物体間距離演算プログラムが、前記 2 つの凸物体のうちの一方が凸多角形である場合における該凸多角形の頂点の集合を包含する、前記凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を、前記凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいて該凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報に更新する形状情報更新手段と、

前記凸曲線物体の形状情報に基づいて該凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを生成する曲線パッチ情報生成手段とを有するものであることを特徴とする請求項 15 記載の物体間距離演算プログラム記憶媒体。

5

【請求項18】 前記第2の最近接ベクトル演算手段が、前記凸物体が移動もしくは変形された場合に、前記第1の最近接ベクトル演算手段において移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、前記第2の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最近接ベクトルに修正するものであることを特徴とする請求項17記載の物体間距離演算プログラム記憶媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、コンピュータ上に構築された物体（CG（コンピュータグラフィックス）モデル）の最近接点間距離を算出する物体間距離演算装置、およびそのような最近接点間距離を算出するための物体間距離演算プログラムが格納されてなる物体間距離演算プログラム記憶媒体に関する。

【0002】

【従来の技術】 例えば、機構設計用CADシステム、ロボットによるプログラミング、オフライン・ティーチング、更に、高速なグラフィックスWS（ワークステーション）／PC（パーソナルコンピュータ）を使ったゲーム、アニメーション、ウォークスルー等の仮想現実感システム等の分野において、コンピュータ上に構築されたCGモデルどうしの最近接点間距離を算出し、それらCGモデルが互いに離れているかあるいは互いに干渉しているか否かを判定し、あるいは離れているときの干渉までの余裕度を知ることが望まれている。

【0003】 この要望に応えるために従来行われていた干渉チェックの方式は、以下のように分類される。

（a）球による被覆を使った方法。物体を球の集合で覆い、球間の干渉チェックを繰り返すことにより物体間の干渉状態を判定する。米国特許第4,578,757号公報（Stark）、米国特許第4,922,430号公報（Wavish）、米国特許第5,056,231号公報（Nakano et al.）、特開平6-83422号公報、特開平2-224004号公報、特開平6-259506号公報、特開平7-100733号公報等に開示された方法がこれに当たる。

【0004】 （b）空間を細かいラティスの集合に分割し、障害物が占めている領域とそれ以外の領域に符号を割り付けた空間マップを作成する。相手側の対象物体が空間マップのどこに位置するかを検索することにより、干渉状態を判定する。オクトツリーの方法もこれに含まれる。米国特許第5,150,452号公報（Pollack）、米国特許第5,347,459号公報（Greenspan et al.）に提案された方式がこれに相当する。特に、米国特許第5,347,459号公報には、検索を簡便に行なうために、上記（a）の球被覆の方法も併用している。

6

【0005】 （c）干渉している領域とそれ以外の領域のマップを、ロボテックスの分野で良く知られた“コンフィギュレーション・スペース（Configuration Space）”上に構築し、干渉判定をこの空間内で行なう方式。米国特許第5,047,916号公報（Kondo）に開示された方式がこれに相当する。この公報に開示された方式では、コンフィギュレーションスペース内をラティス状に区切り、干渉判定用のマップを作成している。

10 【0006】 （d）「E. G. Gilbert, D. W. Johnson, and S. S. Keerthi, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 2, pp. 193-203, 1988」には、対象を凸多面体に限定し、凸多面体どうしの最近接点間の距離を求める手法が提案されている。

20 【0007】 この手法は、2つの凸多面体の最近接点どうしを結ぶ、それら2つの凸多面体のうちの一方の凸多面体（自分）から他方の凸多面体（相手）に向かう方向のベクトル（最近接ベクトル）と、自分を構成する各頂点の位置ベクトルそれぞれとの内積どうしを比較すると、自分の、相手に対する最近接点に近い頂点についての内積の方が、その自分の最近接点から離れた頂点についての内積よりも大きな値を持つという原理に基づいて、それら2つの凸多面体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルを求める手法である。

【0008】

30 【発明が解決しようとする課題】 上記（a）～（c）の手法の対象は、いずれも凸多面体に限られず、さらに凸物体にも限られず、任意の形状を有する物体であってもよい点で上記（d）の手法に比べ適用範囲は広いが、その一方で、上記（a）～（c）の手法は、上記（d）の手法に比べ以下の欠点を有する。

40 【0009】 すなわち、上記（a）の球被覆による手法では、物体を球で覆うという前処理を必要とする、凸多面体を対象とする場合に、上記（d）の手法に比べ余分な計算を必要とする、また、対象間の距離が算出されず、干渉までにどの程度のマージンが残されているか等の計測ができないという問題がある。また、上記（b）の手法では、作業空間をラティスに区切ったマップを作成するための前処理に時間がかかる。また、環境が動く場合にはマップを作成し直す必要があり、環境変動に対してリアルタイムに対応することができない。空間をラティス状に区切るため、単位ラティス以上の精度の情報を算出することができないという問題がある。

50 【0010】 さらに、上記（c）の手法では、コンフィギュレーションスペースの作成に時間が掛かる。また、上記（b）と同様に、環境が動く場合にはマップを作成し直す必要があり、環境変動に対してリアルタイムに対応することができない。上述の米国特許第5,047,

7

916号公報に提案されたような、コンフィギュレーション・スペースをラティス状に区切る手法の場合には、単位ラティス以上の精度の情報を算出することができない。

【0011】これら(a)～(c)の手法に比べ、上記(d)の手法は、特別な前処理を必要とせず互いに動いている対象同士の距離を極めて高速に算出することが可能であるが、対象が凸多面体に限定されている。従って、意匠設計等で盛んに使われている自由曲面を持った物体間の干渉状態のチェックに関しては、自由曲面を持った物体を非常に多数の多面体パッチを張り合わせた集合体で近似して処理を行なう必要がある。しかし、この方法では、多面体パッチの数が極めて多くなり、物体をグラフィカルに表示する速度が遅くなる、表示速度を速くするために物体を表現する多面体パッチの数を減らして距離計算ないし干渉チェックを行なうと誤差が大きくなる、等の欠点を有している。

【0012】本発明は、上記事情に鑑み、対象を凸曲面を持っていてもよい任意の凸物体にまで広げることで適用範囲を格段に向上させ、しかも2つの凸物体間の距離を高速に算出することのできる物体間距離演算装置、および、そのような、適用範囲が向上し、かつ距離を高速に演算することのできる物体間距離演算プログラムが格納されてなる物体間距離演算プログラム記憶媒体を提供することを目的とする。

【0013】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成する本発明の物体間距離演算装置のうちの第1の物体間距離演算装置は、三次元物体を対象とするものであり、一方が凸多面体であることが許容され他方もしくは双方が凸曲面のパッチの集合からなる凸曲面物体で構成されてなる2つの3次元凸物体の最近接点間距離を、該2つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算装置において、

(1-1) 上記2つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、その2つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、その一方の凸物体を構成する、その一方の凸物体が凸多面体である場合の頂点の位置ベクトル、もしくは、その一方の凸物体が凸曲面物体である場合のその凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、上記一方の凸物体の、上記他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、その一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第1の最近接ベクトル演算手段

(1-2) 上記第1の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、凸曲面物体の最近接点でその凸曲面物体に接する平面と直交する新たな最近接ベクトル

8

に修正する第2の最近接ベクトル演算手段を備えたことを特徴とする。

【0014】本発明の第1の物体間距離演算装置は、

(1-1) の第1の最近接ベクトル演算手段において、

(1-1) に記述した原理、例えば前述した(d)の文献に記載された手法を用いて、対象とする2つの凸物体双方を多面体とみなしたときの最近接ベクトルを求めるものであるが、それにとどまらず(1-2)の第2の最近接ベクトル演算手段において、(1-2)に記述した原理に基づいて、(1-1)の第1の最近接ベクトル演算手段において求められた最近接ベクトルを修正して新たな最近接ベクトルを求めるものであるため、対象となる物体は凸多面体である必要はなく、凸曲面を持った任意の凸物体にまで拡張され、適用範囲が大幅に広がる。しかも、(1-1)、(1-2)に記載した各原理に基づく演算は、前述した(1)～(3)の従来技術に比べ極めて高速な演算が可能であり、しかも干渉しているか否かのみでなく2つの凸物体間の最近接点間距離も求めることができる。

【0015】尚、3つ以上の多数の凸物体が存在し、それら多数の凸物体のうちどの2つの凸物体が干渉しそうか否か、すなわちどの2つの凸物体間の最近接ベクトルを求める必要があるかが明らかでないときは、それら多数の凸物体の全ての組合せについて最近接ベクトルを求めることに代え、各凸物体を包絡球で覆い、それらの包絡球のうち近接した複数の球をさらに1つの包絡球で覆うというようにして2組の階層的メタツリーを構成し、メタツリー同士に縦優先探索(Depth-first探索)を施すことにより接近している可能性の最も高い凸物体のペアを選び出す手法(特開平7-174627号参照)を用いることが好ましい。

【0016】ここで、上記本発明の第1の物体間距離演算装置において、

(1-3) 上記第2の最近接ベクトル演算手段で求められた上記新たな最近接ベクトルに基づいて、上記2つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を備えることが好ましい。

【0017】最終的に干渉しているか否かの判定結果を必要する場合も多いからである。さらに、上記本発明の第1の物体間距離演算装置は、上記(1-1)、(1-2)の各手段に加え、さらに

(1-4) 上記2つの凸物体のうちの一方が凸多面体である場合におけるその凸多角形の頂点の集合を包含する、上記凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を記憶する形状情報記憶手段

(1-5) 上記凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいて、その凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報を求める形状情報更新手段

(1-6) 上記凸曲面物体の形状情報に基づいてその凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを生成する曲面パッチ情報生成手段を備えたものであってもよい。

【0018】本発明の物体間距離演算装置は、従来と比べ高速演算が可能であり、したがって本発明の物体間距離演算装置は、上記の(1-4)～(1-5)の各手段を備え、凸物体を移動ないし変形させてそのように移動ないし変形する凸物体間の距離を高速に求める用途に向いている。この場合に、上記(1-1)の第1の最近接ベクトル演算手段では、特開平7-134735号公報に開示されているように、対象の凸物体が直前の移動前の位置ないし直前の変形前の状態にあるときの最近接点近傍の領域内の各頂点ないし各制御点のみについて内積を求めてもよい。こうすることにより、第1の最近接ベクトル演算手段において、移動ないし変形後の凸物体について最近接ベクトルを、さらに高速に算出することができる。

【0019】あるいは、隣接するフレーム間の凸物体の移動量ないし変形量が所定量以下の場合、移動ないし変形後の最近接ベクトルを求めるにあたり、以下に説明するように、第1の最近接ベクトル演算手段での最近接ベクトルの算出は省略してもよい。本発明の第1の物体間距離演算装置における、そのように構成された態様は、上記(1-2)の第2の最近接ベクトル演算手段が、上記凸物体が移動もしくは変形された場合に、上記第1の最近接ベクトル演算手段において移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、上記第2の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最近接ベクトルに修正するものであることを特徴とする。

【0020】連続した移動もしくは連続した変形において、直前の位置ないし直前の変形状態からの変化が僅かである場合、第1の最近接ベクトル演算手段で概略の最近接ベクトルを新たに求め直す代わりに、今回の移動もしくは変形前、すなわちその凸物体が直前の移動前の位置ないし直前の変形状態にあるときに第2の最近接ベクトル演算手段で求められた直前の最近接ベクトルを概略の最近接ベクトルとして用い、その概略の最近接ベクトルとして用いた直前の最近接ベクトルを修正することにより、今回の移動後もしくは変形後の凸物体についての最近接ベクトルを求めることができる。こうすることにより、移動ないし変形のたびに第1の最近接ベクトルで最近接ベクトルを新たに算出し直す場合と比べ、一層の高速演算処理が可能となる。

【0021】さらに、上記本発明の第1の物体間距離演算装置において、

(1-7) 上記(1-4)の形状情報記憶手段に記憶された形状情報および上記(1-5)の形状情報更新手段により求められた新たな形状情報に基づいて描画された凸物体を表示する表示手段を備えることが好ましい。

【0022】このような表示手段を備えることにより、凸物体の移動状態ないし変形状態を直感的に把握することができる。上記目的を達成する本発明の物体間距離演算装置のうちの第2の物体間距離演算装置は、二次元凸物体を対象とするものである。以下に説明する本発明の第2の物体間距離演算装置の構成に対する作用はこれまで説明した第1の物体間距離演算装置の作用と同一であるため、作用についての説明は省略する。

【0023】本発明の第2の物体間距離演算装置は、一方が凸多角形であることが許容され他方もしくは双方が凸曲線のパッチの集合からなる凸曲線物体で構成される2つの2次元凸物体の最近接点間距離を、その2つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算装置において、

(2-1) 上記2つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、その2つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、その一方の凸物体を構成する、その一方の凸物体が凸多角形である場合の頂点の位置ベクトル、もしくはその一方の凸物体が凸曲線物体である場合のその凸曲線物体を構成する凸曲線面パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、上記一方の凸物体の、他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、その一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第1の最近接ベクトル演算手段

(2-2) 上記第1の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、凸曲線物体の最近接点でその凸曲線物体に接する直線と直交する新たな最近接ベクトルに修正する第2の最近接ベクトル演算手段を備えたことを特徴とする。

【0024】ここで、上記本発明の第2の物体間距離演算装置において、

(2-3) 上記第2の最近接ベクトル演算手段で求められた上記新たな最近接ベクトルに基づいて、2つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を備えることが好ましい。

【0025】また、上記本発明の第2の物体間距離演算装置は、上記(2-1)、(2-2)の各手段に加え、

(2-4) 2つの凸物体のうちの一方が凸多角形である場合におけるその凸多角形の頂点の集合を包含する、凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を記憶する形状情報記憶手段

(2-5) 凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいて、その凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報を求める形状情報更新手段

(2-6) 凸曲線物体の形状情報に基づいてその凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを生成する曲線パッチ情報

11

生成手段を備えたものであってもよい。

【0026】この場合に、上記(2-2)の第2の最近接ベクトル演算手段が、上記凸物体が移動もしくは変形された場合に、第1の最近接ベクトル演算手段において移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、第2の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最近接ベクトルに修正するものであることが好ましい。

【0027】さらに、上記本発明の第2の物体間距離演算装置が、

(2-7) 上記形状情報記憶手段に記憶された形状情報および上記形状情報更新手段により求められた新たな形状情報に基づいて描画された凸物体を表示する表示手段を備えたものであることが好ましい。

【0028】また上記目的を達成する本発明の物体間距離演算プログラム記憶媒体のうちの第1の物体間距離演算プログラム記憶媒体は、一方が凸多面体であることが許容され他方もしくは双方が凸曲面のパッチの集合からなる凸曲面物体で構成されてなる2つの3次元凸物体の最近接点間距離を、該2つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算プログラムであって、

(3-1) 上記2つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、その2つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、その一方の凸物体を構成する、その一方の凸物体が凸多面体である場合の頂点の位置ベクトル、もしくは、その一方の凸物体が凸曲面物体である場合のその凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、上記一方の凸物体の、上記他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、その一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第1の最近接ベクトル演算手段

(3-2) 上記第1の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、凸曲面物体の最近接点でその凸曲面物体に接する平面と直交する新たな最近接ベクトルに修正する第2の最近接ベクトル演算手段を有する物体間距離演算プログラムが格納されてなることを特徴とする。

【0029】本発明の第1の物体間距離演算プログラム記憶媒体は、そこに格納された物体間距離演算プログラムが、前述の第1の物体間距離演算装置と同様、(3-1)の第1の最近接ベクトル演算手段において、(3-1)に記述した原理、例えば前述した(d)の文献に記載された手法を用いて、対象とする2つの凸物体双方を多面体とみなしたときの最近接ベクトルを求めるものであるが、それにとどまらず(3-2)の第2の最近接ベ

12

クトル演算手段において、(3-2)に記述した原理に基づいて、(3-1)の第1の最近接ベクトル演算手段において求められた最近接ベクトルを修正して新たな最近接ベクトルを求めるものであるため、対象となる物体は凸多面体である必要はなく、凸曲面を持った任意の凸物体にまで拡張され、適用範囲が大幅に広がる。しかも、(3-1)、(3-2)に記載した各原理に基づく演算は、前述した(1)~(3)の従来技術に比べ極めて高速な演算が可能であり、しかも干渉しているか否かのみでなく2つの凸物体間の最近接点間距離も求めることができる。

【0030】尚、3つ以上の多数の凸物体が存在し、それら多数の凸物体のうちどの2つの凸物体が干渉しうか否か、すなわちどの2つの凸物体間の最近接ベクトルを求める必要があるかが明らかでないときは、それら多数の凸物体の全ての組合せについて最近接ベクトルを求めることに代え、各凸物体を包絡球で覆い、それらの包絡球のうち近接した複数の球をさらに1つの包絡球で覆うというようにして2組の階層的メタツリーを構成し、メタツリー同士に縦優先探索(Depth-first探索)を施すことにより接近している可能性の最も高い凸物体のペアを選び出す手法(特願平7-174627号参照)を用いることが好ましい。

【0031】ここで、上記本発明の第1の物体間距離演算プログラム記憶媒体において、そこに格納された物体間距離演算プログラムが、

(3-3) 上記第2の最近接ベクトル演算手段で求められた上記新たな最近接ベクトルに基づいて、上記2つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を有するものであることが好ましい。

【0032】最終的に干渉しているか否かの判定結果を必要する場合も多いからである。さらに、上記本発明の第1の物体間距離演算プログラム記憶媒体は、そこに格納された物体間距離演算プログラムが、上記(3-1)、(3-2)の各手段に加え、さらに

(3-4) 上記2つの凸物体のうち一方が凸多面体である場合におけるその凸多角形の頂点の集合を包含する、上記凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を、上記凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいてその凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報に更新する形状情報更新手段(3-5) 上記凸曲面物体の形状情報に基づいてその凸曲面物体を構成する凸曲面パッチを生成する曲面パッチ情報生成手段を有するものであってもよい。

【0033】本発明の物体間距離演算プログラム記憶媒体に格納された物体間距離演算プログラムは、従来と比べ高速演算が可能なものであり、したがってこの物体間距離演算プログラムは、上記の(3-4)~(3-5)の各手段を備え、凸物体を移動ないし変形させてそのよ

13

うに移動ないし変形する凸物体間の距離を高速に求める用途に向いている。

【0034】この場合に、上記(3-1)の第1の最近接ベクトル演算手段では、特開平7-134735号公報に開示されているように、対象の凸物体が直前の移動前の位置ないし直前の変形前の状態にあるときの最近接点近傍の領域内の各頂点ないし各制御点のみについて内積を求めてもよい。こうすることにより、第1の最近接ベクトル演算手段において、移動ないし変形後の凸物体について最近接ベクトルを、さらに高速に算出することができる。

【0035】あるいは、隣接するフレーム間の凸物体の移動量ないし変形量が所定量以下の場合、移動ないし変形後の最近接ベクトルを求めるにあたり、以下に説明するように、第1の最近接ベクトル演算手段での最近接ベクトルの算出は省略してもよい。本発明の第1の物体間距離演算プログラム記憶媒体に格納された物体間距離演算プログラムにおける、そのように構成された態様は、上記(3-2)の第2の最近接ベクトル演算手段が、上記凸物体が移動もしくは変形された場合に、上記第1の最近接ベクトル演算手段において移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、上記第2の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最近接ベクトルに修正するものであることを特徴とする。

【0036】連続した移動もしくは連続した変形において、直前の位置ないし直前の変形状態からの変化が僅かである場合、第1の最近接ベクトル演算手段で概略の最近接ベクトルを新たに求め直す代わりに、今回の移動もしくは変形前、すなわちその凸物体が直前の移動前の位置ないし直前の変形状態にあるときに第2の最近接ベクトル演算手段で求められた直前の最近接ベクトルを概略の最近接ベクトルとして用い、その概略の最近接ベクトルとして用いた直前の最近接ベクトルを修正することにより、今回の移動後もしくは変形後の凸物体についての最近接ベクトルを求めることができる。こうすることにより、移動ないし変形のたびに第1の最近接ベクトルで最近接ベクトルを新たに算出し直す場合と比べ、一層の高速演算処理が可能となる。

【0037】次に、上記目的を達成する本発明の物体間距離演算プログラム記憶媒体のうちの第2の物体間距離演算プログラム記憶媒体について説明する。本発明の第2の物体間距離演算プログラム記憶媒体は、二次元凸物体を対象とする物体間距離演算プログラムが格納されたものである。以下に説明する本発明の第2の物体間距離演算プログラム記憶媒体に格納された物体間距離演算プログラムの構成に対する作用はこれまで説明した第1の物体間距離演算プログラム記憶媒体に格納された物体間距離演算プログラムの作用と同一であるため、作用についての説明は省略する。

14

【0038】本発明の第2の物体間距離演算プログラム記憶媒体は、一方が凸多角形であることが許容され他方もしくは双方が凸曲線のパッチの集合からなる凸曲線物体で構成されてなる2つの二次元凸物体の最近接点間距離を、その2つの凸物体の、配置位置情報を含む形状情報に基づいて算出する物体間距離演算プログラムであって、

(4-1) 上記2つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルであって、その2つの凸物体のうちの一方の凸物体から他方の凸物体に向かう方向の最近接ベクトルと、その一方の凸物体を構成する、その一方の凸物体が凸多角形である場合の頂点の位置ベクトル、もしくはその一方の凸物体が凸曲線物体である場合のその凸曲線物体を構成する凸曲線面パッチを構成するための制御点の位置ベクトルとの内積のうち、上記一方の凸物体の、他方の凸物体に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、その一方の凸物体の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つ最近接ベクトルを求める第1の最近接ベクトル演算手段

(4-2) 上記第1の最近接ベクトル演算手段で求められた最近接ベクトルを、凸曲線物体の最近接点でその凸曲線物体に接する直線と直交する新たな最近接ベクトルに修正する第2の最近接ベクトル演算手段を有する物体間距離演算プログラムが格納されてなることを特徴とする。

【0039】ここで、上記本発明の第2の物体間距離演算プログラム記憶媒体において、そこに格納された物体間距離演算プログラムが、

(4-3) 上記第2の最近接ベクトル演算手段で求められた上記新たな最近接ベクトルに基づいて、2つの凸物体どうしが干渉しているか否かを判定する干渉判定手段を有するものであることが好ましい。

【0040】また、上記本発明の第2の物体間距離演算プログラム記憶媒体は、そこに格納された物体間距離演算プログラムが、上記(4-1)、(4-2)の各手段に加え、

(4-4) 2つの凸物体のうちの一方が凸多角形である場合におけるその凸多角形の頂点の集合を包含する、凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを構成するための制御点の集合からなる形状情報を、凸物体の移動ないし変形を指示する情報に基づいてその凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を演算することにより新たな形状情報に更新する形状情報更新手段

(4-5) 凸曲線物体の形状情報に基づいてその凸曲線物体を構成する凸曲線パッチを生成する曲線パッチ情報生成手段を有するものであってもよい。

【0041】この場合に、上記(4-2)の第2の最近接ベクトル演算手段が、上記凸物体が移動もしくは変形された場合に、第1の最近接ベクトル演算手段において

15

移動もしくは変形後の最近接ベクトルを求めることに代わり、第2の最近接ベクトル演算手段において今回の移動もしくは変形前に求められた新たな最近接ベクトルをさらに新たな最近接ベクトルに修正するものであることが好ましい。

【0042】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態について説明する。図1は、本発明の物体間距離演算装置の一実施形態を包含するコンピュータシステムの外観図である。

【0043】図1に示すコンピュータシステム100は、CPUやMO（光磁気ディスク）ドライブ装置等が内蔵された本体部101、本体部101からの指示により、表示画面102a上に画像を表示する画像表示部102、このコンピュータシステム100に種々の情報を入力するためのキーボード103、画像表示部102の表示画面102a上の任意の位置を指定するマウス104、本発明の物体間距離演算プログラムの一実施形態を格納しておく記憶部105が備えられている。

【0044】記憶部105に格納された物体間距離演算プログラムは、可搬型記憶媒体であるMO（光磁気ディスク）110に格納されており、そのMO110をこの図1に示すコンピュータシステム100に装填して、このコンピュータシステム100にアップロードされる。またそれと同様に、この図1に示すコンピュータシステム100に格納された物体間距離プログラムを、MO110にダウンロードし、そのMO110を介して他のコンピュータシステムに移すこともできる。

【0045】以下では、物体間距離演算装置の実施形態について説明するが、図1に示すコンピュータ100内にそのような物体間距離演算装置としての機能を実現するプログラムが本発明にいう物体間距離演算プログラムの実施形態であり、そのプログラムが、記憶された状態の記憶部105が、本発明の物体間距離演算プログラム記憶媒体の一実施形態に相当する。また、そのプログラムがMO110に格納されているときは、そのプログラムを格納した状態にあるMO110も、本発明の物体間距離演算プログラム記憶媒体の一実施形態に相当する。

【0046】図2は、本発明の物体間距離演算装置の一実施形態のブロック図である。この図において一本の実線の矢印は初回のみのデータの流れ、二本の実線の矢印は2回目以降のデータの流れ、破線の矢印は、初回と2回目以降とに共通のデータの流れを示している。図2に示す物体間距離演算装置10には、形状情報記憶手段11が備えられている。形状情報記憶手段11には、最近接点間距離算出の対象となる2つの凸物体の頂点の集合ないしは制御点の集合からなる形状情報が記憶されている。これら頂点の集合ないし制御点の集合からなる形状情報は、各頂点ないし各制御点をそれぞれ独立に表現する情報の集合であってもよく、あるいは凸物体の表面を

16

解析的に表現するための関数式であってもよい。最近接点間距離算出の対象となる2つの凸物体のうちの少なくとも1つの凸物体は制御点によって規定される凸曲面パッチの集合から構成される。形状情報記憶手段11には凸曲面パッチを含めて記憶しておいてもよく、制御点のみ記憶しておいて、その記憶された制御点により規定される凸曲面パッチは、後述する曲面パッチ情報生成手段13で生成してもよい。最近接点間距離算出の対象となる2つの凸物体のうちもう一方の凸物体は、凸曲面物体であってもよく、あるいは頂点の集合からなる凸多面体であってもよい。

【0047】形状情報記憶手段11に記憶されていた形状情報は読み出されて形状情報更新手段12に入力される。形状情報更新手段12では、その凸物体の頂点ないし制御点の移動ないし変形後の座標を、形状情報記憶手段11から読み出された形状情報に基づいて、あるいは直前の移動ないし変形後の形状情報に基づいて算出することにより、各フレーム毎に順次移動もしくは変形した凸物体の形状情報が求められる。

【0048】形状情報記憶手段11から読み出された初期状態としての形状情報、および形状情報更新手段12で順次算出された形状情報は、曲面パッチ情報生成手段13に入力される。この曲面パッチ情報生成手段13では、形状情報記憶手段11から読み出された形状情報ないし形状情報更新手段で更新された形状情報が凸曲面物体の制御点の集合である場合に、それらの制御点に基づいて、その凸曲面物体の表面を規定する凸曲面パッチが生成される。ただし、形状情報記憶手段11から読み出された凸曲面物体の初期状態を表わす形状情報がその凸曲面物体の初期状態の凸曲面パッチの情報を含むものである場合、形状情報記憶手段11から読み出された初期状態としての凸曲面物体については凸曲面パッチの生成は不要である。この場合、曲面パッチ情報生成手段13では、形状情報更新手段12で更新された後の凸曲面物体についての凸曲面パッチが生成される。

【0049】曲面パッチ情報生成手段13を経由した凸曲面パッチ情報を含む形状情報は、表示手段14に送られ、表示手段14には、初期状態の形状（配置位置を含む）の凸物体、およびその後の、順次移動ないし変更された凸物体が連続的に表示される。また、曲面パッチ情報生成手段13を経由した形状情報のうち初期状態を表わす形状情報は、第1の最近接ベクトル演算手段15に入力される。尚、後述するように、初期状態から移動ないし変形した後の状態を表わす形状情報は、第1の最近接ベクトル演算手段15による演算は不要であるため、直接に、第2の最近接ベクトル演算手段16に入力される。

【0050】第1の最近接ベクトル演算手段15では、入力されてきた初期状態の形状情報に基づいて、対象となる2つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトル

17

ルが求められる。この第 1 の最近接ベクトル演算手段 15 では、最近接ベクトルを求めるにあたり、対象となる 2 つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ、それら 2 つの凸物体のうちの一方の凸物体（自分）から他方の凸物体（相手）に向かう方向の最近接ベクトルと、自分（一方の凸物体）を構成する頂点もしくは制御点の位置ベクトルとの内積のうち、自分の、相手に対する最近接点に近い頂点もしくは制御点についての内積が、自分の最近接点から離れた頂点もしくは制御点についての内積よりも大きな値を持つという原理が採用される。この原理の具体例については後述する。

【0051】この第 1 の最近接ベクトル演算手段 15 で求められる最近接ベクトルは、対象となる 2 つの物体双方を凸多面体とみなしたときの最近接ベクトルであり、凸曲面物体にとっては精度の不十分な最近接ベクトルである。このようにして第 1 の最近接ベクトル演算手段 15 で求められた最近接ベクトルは、対象となる 2 つの凸物体の形状情報（曲面パッチ情報を含む）とともに、第 2 の最近接ベクトル演算手段 16 に入力される。その第 2 の最近接ベクトル演算手段 16 では、凸曲面物体の最近接点でその凸曲面物体に接する平面と 2 つの凸物体の最近接点どうしを結ぶ最近接ベクトルとが直交するという原理に基づいて、第 1 の最近接ベクトル演算手段 15 で求められた最近接ベクトルがさらに高精度の新たな最近接ベクトルに修正される。この原理の具体例についても後述する。

【0052】第 2 の最近接ベクトル演算手段 16 で求められた最近接ベクトルは、干渉判定手段 17 に入力され、その最近接ベクトルの長さが微小量 ϵ （例えば 10^{-10} ）よりも短い場合に対象としている 2 つの凸物体が干渉状態にあり、それよりも長い場合にそれら 2 つの凸物体が互いに離れていると判定される。この判定結果は表示手段 14 に送られ、表示手段 14 では、対象としている 2 つの凸物体とともに、干渉状態の有無を表わす情報が表示される。

【0053】上述したように、第 1 の最近接ベクトル演算手段 15 で最近接ベクトルを求める必要があるのは対象としている 2 つの凸物体が初期状態にあるときであり、形状情報更新手段 12 で移動ないし変形が行なわれた第 2 フレーム以降の形状情報は、第 1 の最近接ベクトル演算手段 15 はバイパスないし素通りして、直接に、第 2 の最近接ベクトル演算手段 16 に入力される。第 2 の最近接ベクトル演算手段 16 では、第 2 フレーム以降の各フレームについては、直前のフレームについて自分自身で求めた最近接ベクトルを今回のフレームについての概略の最近接ベクトルであるとみなして、その概略の最近接ベクトルを、上述の原理に基づいて今回のフレームについての高精度の最近接ベクトルに修正する。

【0054】以上のようにして、表示手段 14 には、対象としている 2 つの凸物体が移動ないし変形している

18

状態と、それら 2 つの凸物体が干渉状態にあるか否かがリアルタイムで表示される。尚、ここでは図 2 を参照して、対象としている 2 つの凸物体が 3 次元物体であることを前提にした説明を行なったが、2 次元物体を対象とする場合も同様であるため、ここでは、2 次元物体についての説明は省略する。

【0055】図 3 は、本発明の物体間距離演算装置をコンピュータシステム内に表現した場合の一実施形態のハードウェア構成を示すブロック図である。図 3 に示す物体間距離演算装置 20 において、CPU 23 では、最近接ベクトルを算出する基本アルゴリズム、計算結果を表示するための演算、物体の動きをグラフィカルに表示するための演算、その他、あらゆる論理演算を行なう。

【0056】記憶装置 27 には、作業環境や部材の形状データ、それらの初期位置、本発明に添った物体間距離演算装置を実現するアルゴリズムの実行モジュール、物体の動きをグラフィカルに表示するための実行モジュール、その他、この物体間距離演算装置としての機能を実現するために必要となるデータや実行モジュールが格納されている。

【0057】RAM 26 には、CPU 23 により記憶装置 27 から読み出された作業環境や部材の形状データを格納する形状データメモリ 26 a、例えばマウス等のデータ入力装置 21 を介して入力された部材の移動指令データに基づいて CPU 23 内にて算出した座標変換データを格納する座標変換データメモリ 26 b、形状データメモリ 26 a に格納された形状データおよび座標変換データメモリ 26 b に格納された座標変換データを使用して CPU 23 内で算出される、作業環境および部材の曲面パッチデータを格納しておく曲面パッチデータメモリ 26 c、最近接ベクトルを算出する基本アルゴリズムおよび曲面パッチデータメモリ 26 c に格納された曲面パッチデータを使用して CPU 23 内で算出された最近接ベクトルデータ（最近接点、物体間距離、干渉判定結果等を含む）を格納しておく最近接ベクトルデータメモリ 26 d、形状データメモリ 26 a に格納された形状データ、座標変換データメモリ 26 b に格納された座標変換データを使用して CPU 23 内で算出された、移動後の部材形状を表わす形状変換データを格納しておく形状変換データメモリ 26 e の各メモリを備えている。

【0058】データ入力装置 21 は、作業環境や部材の位置データや移動データをインターフェース 22 を介して CPU 23 に送る。グラフィックディスプレイ 25 は、インターフェース 24 を介して送られてきた、RAM 26 内の最近接ベクトルデータメモリ 26 d に格納されていた最近接ベクトルデータおよび形状変換データメモリ 26 b に格納されていた形状変換データの各データに基づいて描画された画像を、グラフィカルに表示する。

【0059】以下に、対象とする 2 つの凸物体が 3 次元

19

凸物体であってそれら2つの凸物体双方が凸曲面物体である場合(ケース1)、対象とする2つの物体が3次元凸物体であってそれら2つの凸物体のうち一方が凸曲面物体、他方が凸多面体である場合(ケース2)、対象とする2つの凸物体が2次元凸物体であってそれら2つの凸物体双方が凸曲線物体である場合(ケース3)及び対象とする2つの凸物体が2次元凸物体であってそれら2つの凸物体のうち一方が曲線物体、他方が凸多角形である場合(ケース4)に分けて最近接ベクトル算出のアルゴリズムについて説明する。

【0060】(ケース1:3次元凸物体、かつ双方が凸曲面物体の場合)図4は、図3のCPU23で実行される処理の流れを示した流れ図である。先ずステップ3__1において、図3の記憶装置27より、部材や作業環境の形状、それらの初期位置が読み込まれる。このステップ3__1では、入力と同時に、初期位置の情報に従って、図3のグラフィックディスプレイ25上に、部材や作業環境が初期配置される。ステップ3__2では、グラフィックディスプレイ25上に表示された部材や、作業環境の中から、マウス等のデータ入力装置21を用いて、干渉状態のチェックを行なうべき対象とする物体をピックアップし選び出す。ステップ3__3では、マウス等を使ってピックアップした対象物体を動かし、その移動データを図3のCPU23に入力する。ステップ3__4では、ステップ3__3で入力された移動データに基づいて、絶対座標空間からの移動を表わす変換行列を計算し、それを基に、各部材や作業環境の移動を表わす、部材、作業環境の形状変換データを作成する。ステップ3__5では、選択した干渉判定対象物体の曲面パッチデータを、ステップ3__4で作成した形状変換データに基づいて作成する。ステップ3__6では、ステップ3__5の結果を受けて、最近接ベクトル算出アルゴリズムを起動する。この最近接ベクトル算出アルゴリズムについては後述する。ステップ3__7では、ステップ3__6の結果およびステップ3__4の形状変換データの結果に基づく画像を、図3のグラフィックディスプレイ25に表示する。ステップ3__8では、ステップ3__7で算出された干渉判定対象物体間の距離dの値をしきい値εと比べ、 $d < \epsilon$ の場合には干渉状態にあると判定し、ステップ3__9において干渉ポイントを表示する。ステップ3__10では、ステップ3__3からステップ3__8およびステップ3__9までの処理を続行するかどうかを判断し、続行する場合にはステップ3__3に戻って次フレームの移動データを入力する。続行しない場合には、全体の処理を抜ける。

【0061】図5は、図4のステップ3__6の最近接ベクトル算出アルゴリズムの詳細を表わした流れ図である。図6は、図5の内、ステップ4__1~4__9のフローを例示した図であり、本発明にいう第1の最近接ベクトル演算手段の一実施形態の説明図である。また、図7

20

は、図5のステップ4__10~4__12のフローを例示した図であり、本発明にいう第2の最近接ベクトル演算手段の一実施形態の説明図である。

【0062】先ず、図5のステップ4__1では、二つの対象物体の各々の重心を結び、 v_0 とする(図6(a)参照)。重心としては、通常、曲面を定義する位置ベクトル集合 $\{Q_i\}$ の平均をとる。多面体の場合には、頂点ベクトルの平均を取る。次にステップ4__2において、 $-v_0$ と図6の左方の物体を定義する位置ベクトル集合 $X = \{Q_i\}$ との内積をとり、その最大値を表わす位置ベクトルを p_0 とする。同様に、 v_0 と図6の右方の物体を定義する位置ベクトル集合 $Y = \{Q'_i\}$ との内積を取り、その最大値を表わす位置ベクトルを q_0 とする。

【0063】ステップ4__3において、 v_0 を $v_1 = p_0 - q_0$ に更新する(図6(b)参照)。ステップ4__4において、ステップ4__2と同様に、 $-v_1$ と図6の左方の物体を定義する位置ベクトル集合 $X = \{Q_i\}$ との内積を取り、その最大値を表わす位置ベクトルを p_1 とする。また、 v_1 と図6の右方の物体を定義する位置ベクトル集合 $Y = \{Q'_i\}$ との内積をとり、その最大値を表わす位置ベクトルを q_1 とする。一般には、 p_1 は、 p_0 とは異なる位置ベクトルであり、 q_1 は、 q_0 とは異なる位置ベクトルである。

【0064】ステップ4__5において、 v_1 を $v_2 = p_1 - q_1$ に更新する。図5のステップ4__6、ステップ4__7に示すように、同様の操作を繰り返して v_i を更新していき、ステップ4__8において、 v_i の収束ベクトル v_{final} を算出する。ここで、 v_i は正確には以下のように更新される。 v_i は、ベクトル集合 Y_i により張られる凸包への最近接ベクトルであり、ベクトル集合 Y_i は、 $Y_{i+1} = \{sub Y_i, p_{i+1} - q_{i+1}\}$ の形で更新され、 $sub Y_i$ は Y_i の部分集合であって、この時、 v_i は以下のように表わされる。

【0065】

【数1】

$$v_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i (p_i - q_i), \quad p_i - q_i \in sub Y_i,$$

$$\lambda_i > 0, \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

【0066】ここで、 m は3次元ユークリッド空間では最大4であり、 v_i は原点からの、 $m=1$ の場合は頂点への、 $m=2$ の場合は線分への、 $m=3$ の場合は三角形パッチへの最近接ベクトルとして表現される。 $m=4$ の場合は、四面体の内部、即ち $v=0$ となる。「E. G. Gilbert, D. W. Johnson, and S. S. Keerthi, "A Fast Procedure for Computing the Dis

21

tance Between Complex Objects in Three-Dimensional Space," IEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 2, pp. 193-203, 1988] には、係数 λ_k を効率よく計算するアルゴリズムが提示されている。図5に示す、頂点 p_i , q_i , ベクトル ν_i の更新過程は、ほとんどの凸多面体に対し、2、3回で収束することが確かめられている。 ν_{final} を算出するまでの計算量は、主に内積計算

【0067】

【数2】

$$\max \{-\nu_i \cdot x : x \in X\}, \\ \max \{-\nu_i \cdot y : y \in Y\}.$$

【0068】から発生し、従って、その負荷は、位置ベクトルの総数 $M = M_1 + M_2$ に比例する。次に、図5とともに図7を参照しながら、図5のステップ4__9以降、即ち、本発明にいう第2の最近接ベクトル演算手段の一実施形態について説明する。図5のステップ4__9では、 ν_{final} の表式

【0069】

【数3】

$$\nu_{final} = \sum_{k=1}^n \lambda_k (p_k - q_k),$$

【0070】から、位置ベクトル p_i , q_i をそれぞれ制御点として持つ曲面パッチを1組選び出す。一般に、位置ベクトル集合 $\{p_i\}$ を制御点に持つ曲面パッチは $m=1, 2$ では p_i の回りに複数個存在するが、選び出す曲面パッチはそれらのうち、いずれでもよい。ステップ4__10では、選び出した曲面パッチ上にて、 ν_{final} を初期値として ν_{final} を以下のように更新してい

$$f_u(u, w) \equiv \frac{\partial P}{\partial u} \cdot \nu_{curve} = [3u^2 \quad 2u \quad 1 \quad 0] M_R \cdot (B_R \cdot \nu_{curve}) \cdot M_R^T W^T = 0$$

$$f_w(u, w) \equiv \frac{\partial P}{\partial w} \cdot \nu_{curve} = U M_R \cdot (B_R \cdot \nu_{curve}) \cdot M_R^T \begin{bmatrix} 3w^2 \\ 2w \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

【0075】を満たす u, w を繰り返し法で求める。即ち、

【0076】

【数6】

22

*く。

【0071】以下では、曲面パッチがスプライン (B-spline) 曲面

【0072】

【数4】

$$P_{i,j}(u, w) = U M_R B_R M_R^T W^T$$

$$B_R = \begin{bmatrix} Q_{i-1,j-1} & Q_{i-1,j} & Q_{i-1,j+1} & Q_{i-1,j+2} \\ Q_{i,j-1} & Q_{i,j} & Q_{i,j+1} & Q_{i,j+2} \\ Q_{i+1,j-1} & Q_{i+1,j} & Q_{i+1,j+1} & Q_{i+1,j+2} \\ Q_{i+2,j-1} & Q_{i+2,j} & Q_{i+2,j+1} & Q_{i+2,j+2} \end{bmatrix}$$

$$M_R = \begin{bmatrix} -1/6 & 1/2 & -1/2 & 1/6 \\ 1/2 & -1 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & 0 & 1/2 & 0 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 & 0 \end{bmatrix}$$

20

$$U = [u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1]$$

$$W = [w^3 \quad w^2 \quad w \quad 1]$$

但し、 u, w は、 $0 \leq u, w \leq 1$ の変数 (スケラ) である。

【0073】で表現されているものとする。先ず、ベクトル ν_{curve} の初期値を、図5のステップ4__8で求めた ν_{final} とする。頂点 p_i , q_i を更新するにあたり内積の最大値をとったように

【0074】

【数5】

30

23

$$\frac{\partial f_u}{\partial u} = [6u \ 2 \ 0 \ 0] D W^T$$

$$\frac{\partial f_u}{\partial w} = [3u^2 \ 2u \ 1 \ 0] D \begin{bmatrix} 3w^2 \\ 2w \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial f_w}{\partial w} = U D \begin{bmatrix} 6w \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta u \\ \delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_u(u, w)}{\partial u} & \frac{\partial f_u(u, w)}{\partial w} \\ \frac{\partial f_w(u, w)}{\partial u} & \frac{\partial f_w(u, w)}{\partial w} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -f_u(u, w) \\ -f_w(u, w) \end{bmatrix}$$

$$u \rightarrow u + \delta u$$

$$w \rightarrow w + \delta w$$

【0080】のように u, w を更新していく。 u, w の初期値としては、ここでは一例として $u = w = 1/2$ とする。以上の操作を図7に示すように2つの凸曲面物体双方について行なう。収束した u, w の値 u_1, w_1 を曲面の方程式に代入して得られる、2つの凸曲面物体上の点どうしを結び、 ν_{curve} とする。 ν_{curve} を $\nu_{curve,1}$ に更新して上記の計算を同じように繰り返す。このとき、 u, w の初期値としては、 u_1, w_1 をとる。収束した u, w から得られる ν_{curve} を $\nu_{curve,2}$ とする。

【0081】上記の繰り返し計算により最終的に得られる ν_{curve} を $\nu_{curve,final}$ とする。この繰り返し計算の途中において、 u, w の値が $0 \leq u, w \leq 1$ の範囲を越えたならば、越えた方向の曲面パッチに移行して、上記計算を繰り返す。以上が図5のステップ4__10, 4__11の過程である。図5のステップ4__12では、このようにして求めた $\nu_{curve,final}$ を最終的に求めた最近接ベクトル $\nu_{closest}$ とする。上記の収束過程の様子は、図7に示す通りである。

24

$$* [0077] \\ \text{【数7】}$$

$$\frac{\partial f_w}{\partial u} = \frac{\partial f_u}{\partial w}$$

$$D = M_n \cdot (B_n \cdot \nu_{curve}) \cdot M_n^T$$

【0078】として、

$$10 \quad [0079] \\ \text{【数8】}$$

【0082】（ケース2：3次元凸物体、かつ一方が凸曲面物体、他方が凸多面体の場合）ケース1との相違点について説明する。二つの対象物体間の最近接ベクトルを求める過程において、一方が凸曲面物体、もう一方が凸多面体の場合には、図5に示した過程において凸多面体に対してはステップ4__1～ステップ4__8のプロセス、凸曲面物体に対してはステップ4__1～ステップ4__11のプロセスを繰り返すことにより最終的に $\nu_{closest}$ を算出する。

【0083】（ケース3：2次元凸物体、かつ双方が凸曲面物体の場合）上記の最近接ベクトル算出法は、2次元においても以下のように適用される。以下、曲線パッチをスプライン曲線（B-spline曲線）で考える。図5のステップ4__1～ステップ4__8のプロセスは、2次元の場合であっても、成分を2次元にただけでそのまま成立する。図5のステップ4__9の「曲面パッチの選出」は、「曲線パッチの選出」となる。図5のステップ4__10の $\nu_{curve,i}$ の更新過程は以下のよう

50 になる。

25

【0084】いま、2つの対象物体についてそれぞれ選び出した2つのB-spline曲線のうち一方を、

【0085】

【数9】

$$P_i(t) = [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1] M_k \begin{bmatrix} Q_{i-1} \\ Q_i \\ Q_{i+1} \\ Q_{i+2} \end{bmatrix}$$

$$M_k = \begin{bmatrix} -1/6 & 1/2 & -1/2 & 1/6 \\ 1/2 & -1 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & 0 & 1/2 & 0 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J(t) \equiv \frac{dP_i(t)}{dt} \cdot \nu_{curve} = [3t^2 \quad 2t \quad 1 \quad 0] M_k \begin{bmatrix} Q_{i-1} \cdot \nu_{curve} \\ Q_i \cdot \nu_{curve} \\ Q_{i+1} \cdot \nu_{curve} \\ Q_{i+2} \cdot \nu_{curve} \end{bmatrix} = 0$$

$$\nu_{curve} = \begin{bmatrix} \nu_x \\ \nu_y \end{bmatrix}$$

【0088】（ケース4：2次元凸物体、かつ一方が凸曲線物体、他方が凸多角形の場合）二つの対象物体間の最近接ベクトルを求める過程において、一方が凸曲線物体、もう一方が凸多角形の場合には、凸多角形に対しては、図5の過程のうちステップ4__1～4__8を、ケース3と同様に2次元に直したプロセス、凸曲線物体に対しては図5の過程のうちステップ4__1～ステップ4__11をケース3と同様に2次元に直したプロセスを繰り返すことにより、最終的に $\nu_{closest}$ を算出する。

【0089】次に、二つの凸物体が時間的に移動ないし変形する場合の最近接ベクトルの求め方について説明する。ここでは、対象とされる2つの凸物体が3次元物体であって、かつ双方が凸曲面物体であるとする。他のケースについても、上述と同様に、より簡単化されたアルゴリズムにより適用可能である。二つの凸曲面物体間の最近接ベクトルを時間に関して連続的に求めていく場合、図5のプロセスは図8で置き換えられる。

【0090】まず、ステップ7__1では、初回の最近接ベクトルを、図5のプロセスと同一のプロセスで求める。ステップ7__2において、ステップ7__1で求めた最近接ベクトルを $\nu_{closest,previous}$ として ν_{final} に代入し、ステップ7__3において、曲面パッチを、直前のフレームの曲面パッチから今回のフレームの曲面パッチに置き換え、ステップ7__4～7__6では、図5のステッ

26

*【0086】とする。ここで、 Q_i はB-Spline曲線の制御点である。B-spline曲線の t による微分と $\nu_{curve,i}$ との内積をゼロにおいた次式 $J(t) = 0$ の、 $0 \leq t \leq 1$ を満たす実根を求める。もう一方の選び出したB-spline曲線についても同様の手続を行ない、求めたポイントどうしを結んで次ステップの $\nu_{curve,i}$ とする。以降の処理は、3次元の場合と同じである。

【0087】

10 【数10】

プ4__10～4__12と同様の処理を行なう。ステップ7__7において、次のフレームの最近接ベクトルの計算を行なうか否かを判定し、行なう場合には、ステップ7__2に戻り、今回求めた $\nu_{closest,previous}$ として処理を繰り返す。

【0091】一方の物体が凸多面体の場合には、ステップ7__4のプロセスは凸多面体に対して図6に示した内積計算、凸曲面物体に対しては図7に示した更新計算が行なわれる。2次元の場合も同様にして連続型に拡張される。

【0092】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、対象とされる2つの凸物体双方もしくは一方が凸曲面パッチで表わされる任意の凸物体についてそれら2つの凸物体の最近接点間距離が高精度に、かつ高速に求められ、例えば、表示画面上に2つの凸物体を表示して移動ないし変形させながら、リアルタイムに、それら2つの凸物体の最近接点間距離ないし干渉状態を算出することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の物体間距離演算装置の一実施形態を包含するコンピュータシステムの外觀図である。

【図2】本発明の物体間距離演算装置の一実施形態のブロック図である。

50

27

【図3】本発明の物体間距離演算装置をコンピュータシステム内に表現した場合の一実施形態のハードウェア構成を示すブロック図である。

【図4】処理の流れを示した流れ図である。

【図5】最近接ベクトル算出アルゴリズムの詳細を表わした流れ図である。

【図6】本発明にいう第1の最近接ベクトル演算手段の一実施形態の説明図である。

【図7】本発明にいう第2の最近接ベクトル演算手段の一実施形態の説明図である。

【図8】対象とする物体が移動ないし変形する場合の最近接ベクトル算出アルゴリズムの詳細を表わした流れ図である。

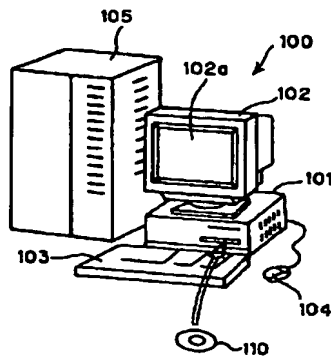
【符号の説明】

- 10 物体間距離演算装置
- 11 形状情報記憶手段
- 12 形状情報更新手段
- 13 曲面パッチ情報生成手段
- 14 表示手段

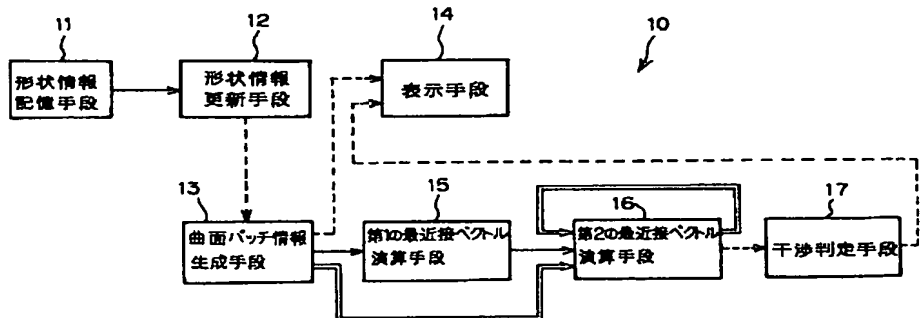
- * 15 第1の最近接ベクトル演算手段
- 16 第2の最近接ベクトル演算手段
- 17 干渉判定手段
- 20 物体間距離演算装置
- 21 データ入力装置
- 22 インターフェース
- 23 CPU
- 24 インターフェース
- 25 グラフィックディスプレイ
- 26 RAM
- 27 記憶装置
- 100 コンピュータシステム
- 101 本体部
- 102 画像表示部
- 103 キーボード
- 104 マウス
- 105 記憶部
- 110 光磁気ディスク (MO)

*

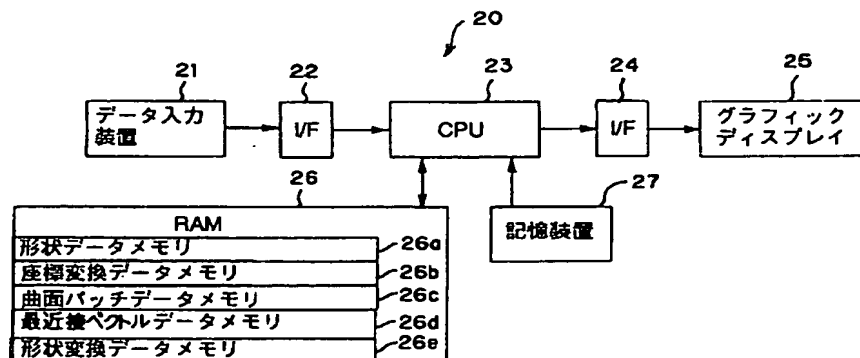
【図1】



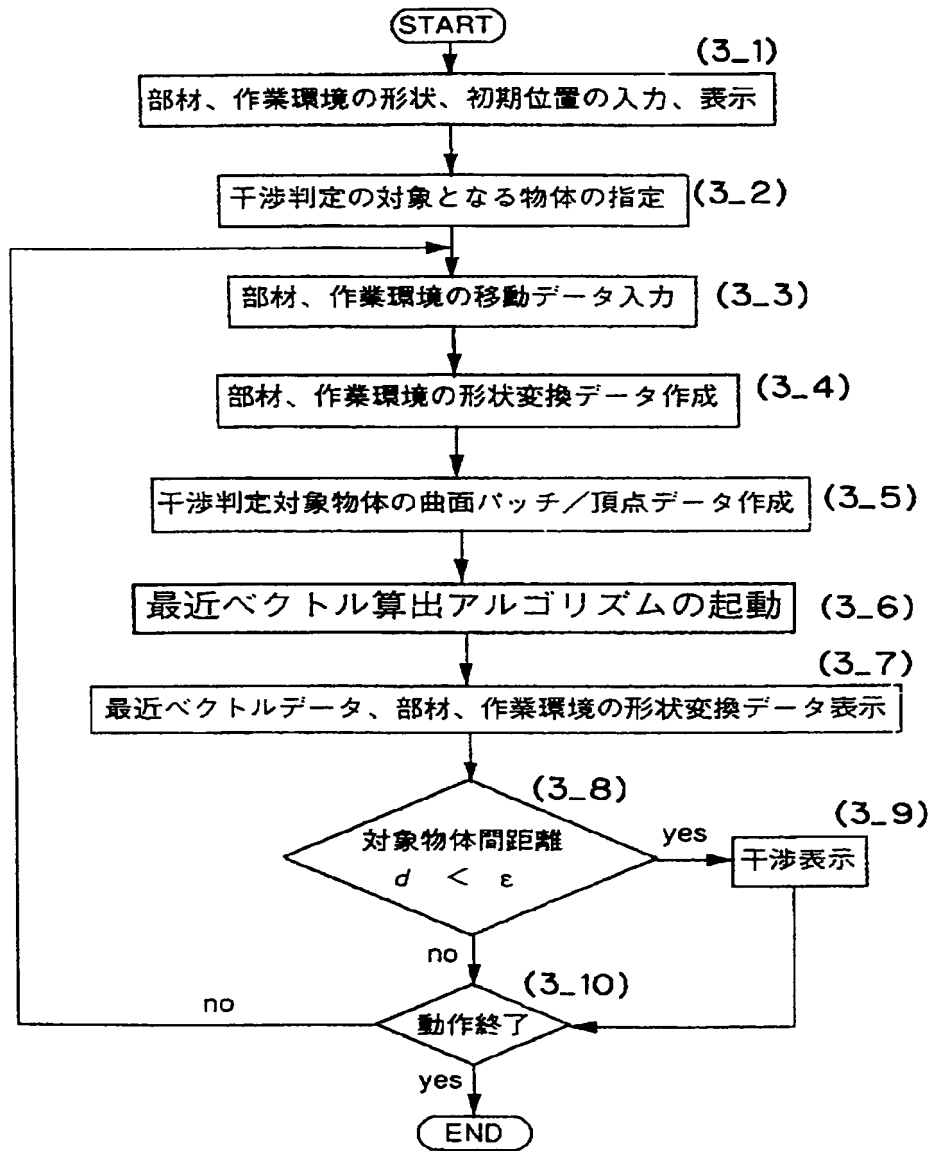
【図2】



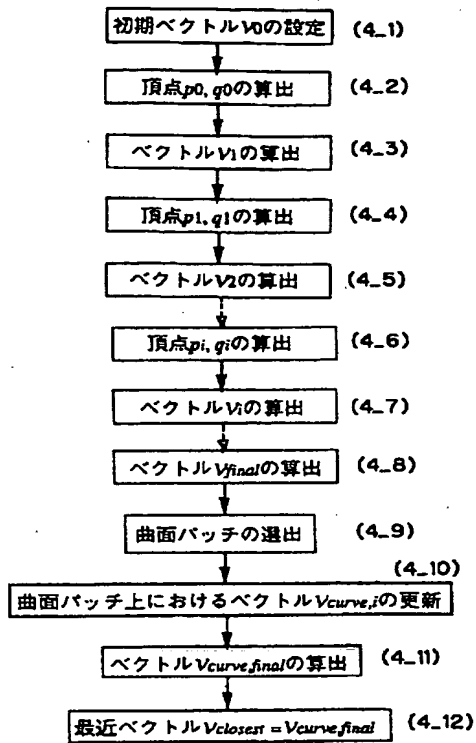
【図3】



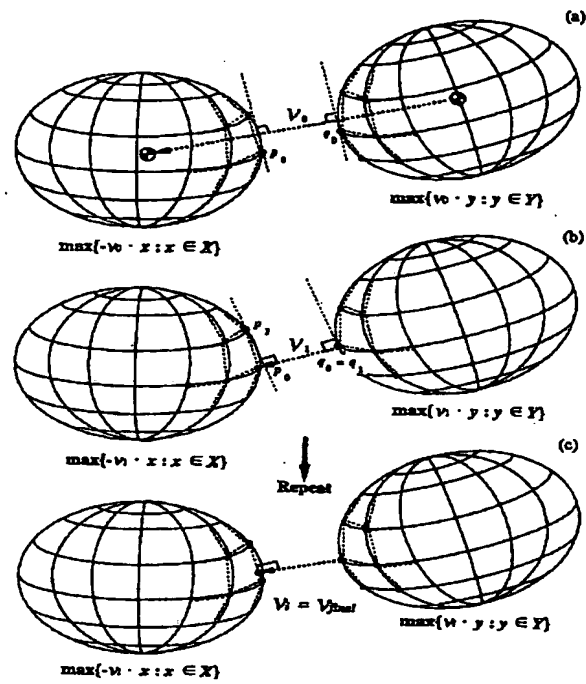
【図4】



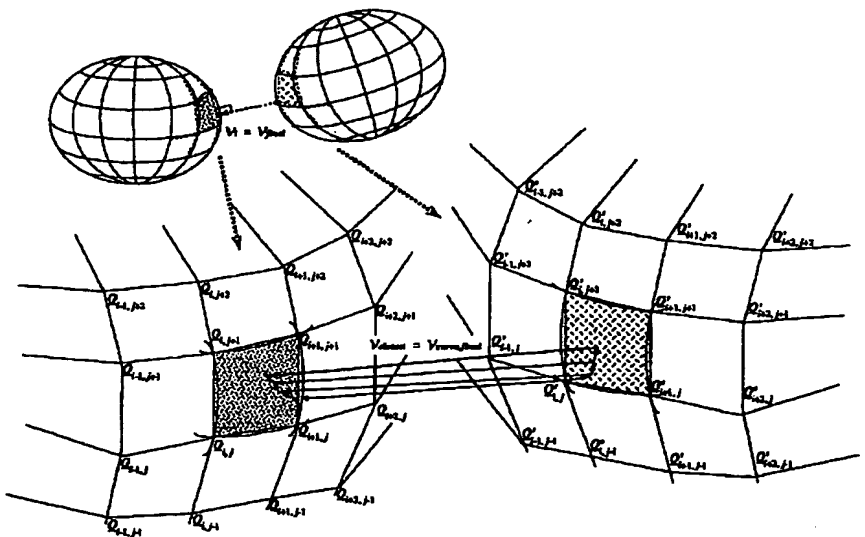
【図5】



【図6】



【図7】



【図8】

